

岩石の繰返し疲労特性について

著者	池見 保紘
号	307
発行年	1970
URL	http://hdl.handle.net/10097/9043

氏 名(本籍) 池 見 保 紘(広島県)

学 位 の 種 類 工 学 博 士

学 位 記 番 号 工 博 第 3 0 7 号

学位授与年月日 昭和 4 6 年 3 月 2 5 日

学位授与の要件 学位規則第 5 条第 1 項該当

研究科専門課程 東北大学大学院工学研究科
(博士課程)資源工学専攻

学 位 論 文 題 目 岩石の繰返し疲労特性について

(主査)

論 文 審 査 委 員 教 授 堀 部 富 男 教 授 吉 沢 幸 雄

教 授 石 浜 渉 教 授 横 堀 武 夫

助教授 小 林 良 二

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 緒 論

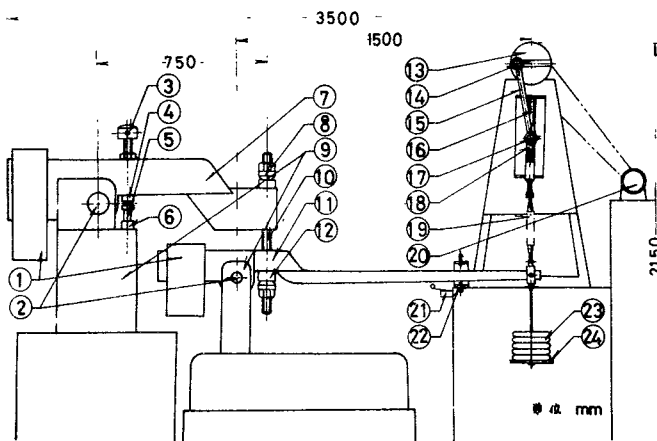
地下開さく空洞等の岩盤構造の設計にあたっては、対象となる岩盤の強度、変形特性等の力学的性質、中でも時間的影響を考慮に入れたクリープ特性、疲労特性について知る必要がある。また一般に、金属材料の疲労強度は温度があまり高くない場合、クリープ強度より低いといわれていることから、岩石の繰返し疲労試験は、地下岩盤構造の設計資料を得る 1 つの手がかりとして注目される。しかしながら、従来岩石の繰返し疲労に関する研究としては、鈴木・西松・R. ヘルセオヨの報告があるにすぎず、しかも S-N 曲線等について満足のゆく結果が得られておらず、この方面の研究の展開がまたれている現状である。

本研究は、砂岩、凝灰岩、大理石、安山岩試料について、低サイクルの繰返し圧縮疲労試験を行ない、S-N曲線、耐久限度、限界繰返し数、変形特性等を調べ、また疲労寿命のばらつきを確率統計論的立場から考察したものである。さらに、上記試料の一部のものについて、湿潤状態における繰返し疲労特性を求め、気乾状態のそれと比較した。

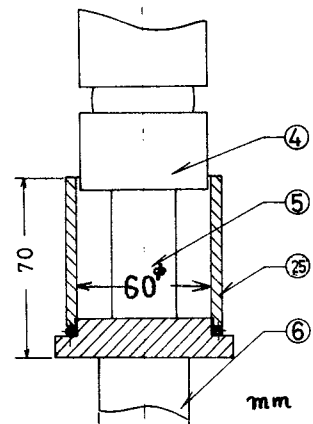
第2章 岩石試料、実験装置ならびに方法

岩石試料としては福島県いわき市常磐炭鉱産の石城砂岩、群馬県多野郡吉井町産の多胡砂岩、島根県八束郡宍道町産の来待砂岩、福島県耶麻郡高郷村産の荻野凝灰岩、山口県美禰郡秋吉台地方産の秋吉大理石、福島県須賀川市江持産の江持安山岩の6試料を用いた。これら岩石試料を25mmφ×50mmの円柱形試験片に整形し、気乾状態の試験片には軸方向に相対して2枚の120Ωワイヤストレンゲージを貼付けた。また、湿潤状態の試験にあたっては、試験片を水中に約1週間浸漬したものをさらに後述の試験片水槽に入れて用いた。なお、本研究の1試験片の最長試験期間は約4週間（繰返し数が 10^6 回）であるので、試験にあたっては、予じめ水中浸漬期間1, 2, 3, 4, 5週間目毎の圧縮強度を調べ、各週毎の圧縮強度の変らぬものを試料として用いた。

第1図は本研究のために製作したダブルレバ式片振り繰返し疲労試験機である。図の各部の名称は、①平衡重錘、②回転軸、③载荷盤調整ネジ、④球座、⑤試験片、⑥受圧器、⑦第2レバ、⑧球座ナット、⑨レバ支持台、⑩レバ連結桿、⑪第1レバ、⑫球座ナット、⑬クランク、⑭クランクピン、⑮連結桿、⑯ガイド、⑰クロスヘッドピン、⑱クロスヘッド、⑲コイルバネ、⑳駆動装置、㉑マイクロスイッチ、㉒ストッパ、㉓重錘、㉔重錘皿である。また第2図は、湿潤状態の繰返し圧縮



第1図 岩石用繰返し疲労試験機



第2図 試験片水槽

疲労試験に用いる試験片ならびに試験片水槽である。図において、④球座、⑤試験片、⑥受圧器、⑦試験片水槽である。試験にあたっては、まず、平衡重錘①によって、第1レバ②、第2レバ③のつりあいを取り、次に4枚のワイヤストレンゲージを貼付けた中空円筒型受圧器⑥をアンビルの上に置き、受圧器の上に試験片⑤を載せ、試験片の上面に載荷盤調整ネジ④によって載荷盤を密着させる。本試験機は、クランク⑤の回転とコイルばね⑥によって、第1レバに加わる重錘⑦の重量を繰返し減ずる方式を取り、レバの上下運動を少なくするように設計してあるので、応力振幅を正しく定め得る正弦波繰返し荷重を試験片に加えることが出来る。なお本試験機で重錘の重量の50倍が試験片に加わることになる。

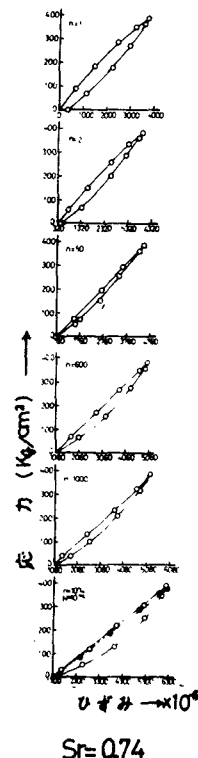
一方、試験片と受圧器のひずみは、動ひずみ計、増幅器を経て、ペンレコーダに記録される。

第3章 気乾岩石試料の繰返し圧縮荷重下における応力-ひずみ特性

一般に岩石はその変形に時間的依存要素が含まれ、応力-ひずみの関係は非線型である場合が多い。さらに岩盤を対象とする作業現場においては、例えば、トンネルの様に長期間その空洞が維持されなければならない場合もあり、又鉱山に於ける坑道の様に、一定期間のみその空洞が維持されていればよい場合もあるので、変形の時間依存性が重要な問題となってくる。そこで本章においては、繰返し圧縮荷重下における気乾岩石試料の変形特性について検討した。

第3図は繰返し応力-ひずみ線図より描いたヒステリシスループの形と繰返し数との関係の1例（来待砂岩試料、上限応力比=0.74）を示したものである。図においてnはその時の繰返し数、Nは破壊し数である。なお上限応力比とは上限応力と本研究の繰返し試験速度と同じ荷重速度（約 $5 \times 10^{-2} \text{ Kg/cm}^2/\text{sec}$ ）における圧縮強度との比をとったものである。

図によると、繰返し数とともに岩石試験片の変形挙動が異なっていく様子がみられる。すなわち、試験の初期の段階では、試験片は非線型弾性を示し、ループの幅も広いが、繰返し数とともにやや線型弾性を示すようになり、ループの幅が狭くなっている。しかし破壊の間際になるとループの幅は再び広くなり破壊に至っている。これは繰返し数とともに岩石試験片内部の流性部分が減じ、弾性部分の占める割合が多くなり、破壊の間際には造岩鉱物粒子の結合が破



第3図 ヒステリシスループの1例（来待砂岩試料）

れてループの幅が再び広がったものと考えられる。

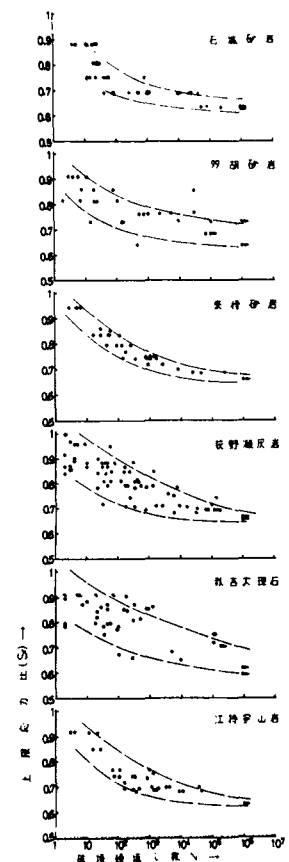
さらに繰返し数とひずみ，残留ひずみとの関係を調べてみた。これによると，繰返し数とともにひずみ，残留ひずみが漸次増加してゆく様子がよく判る。すなわち，ひずみおよび残留ひずみは応力繰返し1回目において大きく生じ，その後は徐々に増加してゆき，破壊間際で著しい増加を示し，破壊に至っている。これにより，岩石試料の疲労破壊はある一定の応力繰返し後突然生じるものではなく，いくつかの破壊過程を経るものと考えられる。また破壊された試験片を肉眼および顕微鏡下で観察し疲労破壊の様子を調べてみたが，少なくとも破壊後の状態をみた限りでは一般の圧縮破壊と何ら変ることとはなかった。

第4章 気乾岩石試料の $S_r - N$ 曲線

本章においては，第2章において述べた6種の気乾岩石試料について，気乾状態で片振り圧縮疲労試験を行ない，上限応力比(S_r)と破壊繰返し数(N)との関係から $S_r - N$ 曲線，限界繰返し数，耐久限度について検討した。さらに，岩石の疲労寿命のばらつきが著しいことから，来待砂岩，荻野凝灰岩試料について，確率統計論的立場から疲労寿命の分布を求め，非破壊確率(P)と破壊繰返し数(N)との関係($P - N$ 線図)，非破壊確率(P)と上限応力比(S_r)との関係($P - S_r$ 線図)，非破壊確率(P)をパラメータとした $S_r - N$ 曲線($P - S_r - N$ 線図)等により， $S_r - N$ 曲線の形，限界繰返し数，耐久限度等について検討した。

第4図は各岩石試料について上限応力比(S_r)と破壊繰返し数(N)との関係を示したものである。図において測点に矢印のついているものは，その回数で破壊しなかったことを示す。図をみると，試料によってはかなりのばらつきのみられるものもあるが，おおよそ $S_r - N$ 曲線の形を推定することが出来る。これより，岩石の限界繰返し数はほぼ $10^4 \sim 10^5$ の範囲にあることがみとめられる。岩石のこの値は鋼材で言われている $10^6 \sim 10^7$ に比べるとはるかに低い。

また各岩石試料とも一定上限応力比に対する疲労寿命に大きなばらつきがみられるが，このばらつきの範囲は上限応力比の



第4図 気乾状態における各岩石試料の $S_r - N$ 曲線

高い部分で小さく、上限応力比が低くなるにしたがって大きくなる傾向がみられる。

さらに、石城砂岩、来待砂岩、荻野凝灰岩、江持安山岩の4試料について耐久限度比 ($Sr_e = \text{耐久限度} / \text{圧縮強度}$) を推定して、 $Sr-N$ 曲線の実験式を求めた。従来金属材料等について提案されている実験式のうちで(1)式が岩石の $Sr-N$ 曲線の関数型としてほぼ妥当であることがわかった。

$$\log (Sr - Sr_e) = c - d \log N \quad (1)$$

ここに、 Sr ; 上限応力比 , Sr_e ; 耐久限度比 , N ; 破壊繰返し数, c, d ; 定数である。

以上、各種岩石試料の $Sr-N$ 曲線の形、実験について述べたが、疲労寿命の著しいばらつきのために耐久限度比、 $Sr-N$ 曲線を的確につかんでいるとは言えない。そこで、次に、確率統計論的立場から疲労寿命の分布を検討し、 $Sr-N$ 曲線、耐久限度比等を精査した。

まず予備的検討として、石城砂岩、来待砂岩、荻野凝灰岩、江持安山岩試料の上限応力比がそれぞれ、0.69, 0.69, 0.70, 0.69における破壊繰返し数 (N) とそれまでに試験片が破壊しない確率 (P) との関係を調べた。その結果、岩石の疲労寿命は本試験条件のもとでは、正規対数分布をなすことがみとめられた。そこで、来待砂岩、荻野凝灰岩の2試料について統計的な考慮に基づいた試験を行なった。以下にその手順を示す。

1) 第4図の $Sr-N$ 曲線のおおよその形より、指定繰返し数を 1×10^2 , 1×10^3 , 1×10^4 , 5×10^4 の4段階とする。

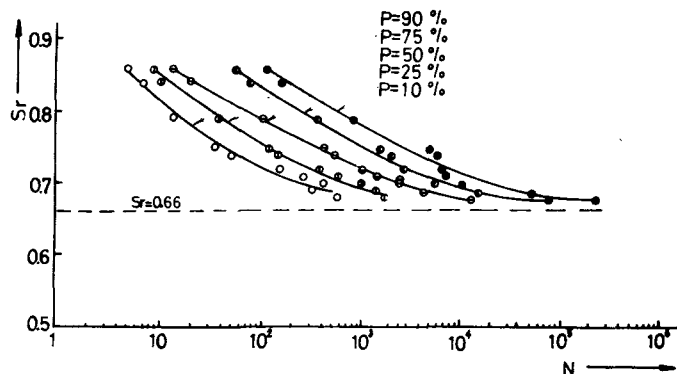
2) 上限応力比レベルは来待砂岩試料においては0.67から0.86までの11段階、荻野凝灰岩試料においては0.68から0.85までの10段階とし、各応力比レベルにおい15個の試験片(来待砂岩試料の $Sr = 0.69$ においては20個)、両岩石試料合わせて320個の試験片を用いる。

3) 各応力比レベルで少なくとも繰返し数 5×10^4 までの試験を行ない、それぞれのレベルにおける非破壊確率を決定する。

4) 実験結果より $P-N$

線図、 $P-Sr$ 線図、 $P-Sr-N$ 線図を描く。

第5図は来待砂岩試料について $P-N$ 線図より、非破壊確率 $P=90\%$, 75% , 50% , 25% , 10% における N の値を読みとり $Sr-N$ 線図に示した $P-Sr-N$ 線図である。



第5図 気乾来待砂岩試料の $P-Sr-N$ 線図

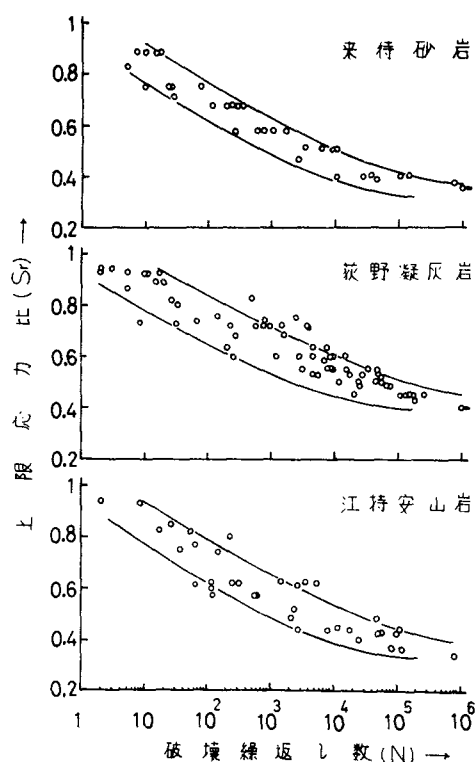
図をみると， $Sr-N$ 曲線の型は第4図において推定したそれとほぼ同じ型で(1)式が岩石についての $Sr-N$ 曲線の関数型としてよいであろうということが確認される。さらに限界繰返し数は $10^4 \sim 10^5$ の範囲にあることもみとめられる。さらに5本の曲線とも $Sr = 0.66$ に漸近しており，実験式を求めるにあたり推定した来待砂岩の耐久限度比0.66と一致する。さらに荻野凝灰岩試料についても同様の結果が得られている。

第5章 湿潤岩石試料の片振り圧縮疲労試験

含水状態が岩石の力学的挙動に与える影響の大きいことから，来待砂岩，荻野凝灰岩，江持安山岩の湿潤岩石試料について片振り圧縮疲労試験を行ない， $Sr-N$ 曲線，限界繰返し数，耐久限度等について検討した。

第6図は各湿潤岩石試料による $Sr-N$ 曲線である。図によると， $Sr-N$ 曲線の形については気乾状態のそれと大差は認められないが，第4図に示すように気乾状態における各岩石試料の耐久限度比は0.65～0.70の範囲にあるのに対し，湿潤状態の来待砂岩は約0.35，荻野凝灰岩は約0.40，江持安山岩は約0.35となり，耐久限度が著しく低下していることがわかる。この湿潤状態における岩石試料の耐久限度の低下の理由については，現在までのところ詳らかではないが，間隙水圧もその1因となり得るものと考えている。また，限界繰返し数は $Sr-N$ 曲線の形から推定して，各湿潤岩石資料についても $10^4 \sim 10^5$ の範囲にあることがみとめられ気乾状態における岩石資料のそれと変わらない。

第6章は結論であり，第2章～第5章の結果ならびに考察のまとめである。



第6図 湿潤状態における各岩石試料の $Sr-N$ 曲線

審 査 結 果 の 要 旨

採鉱学においては、岩盤内構造の設計、岩石切削の解析等岩石力学の分野に属する研究が多く、岩石の力学的諸性質の解明が、近年活発に行なわれている。しかし岩石の疲労に関する研究はまだまだほとんど見られない。

本研究は試作した低サイクルの繰返し圧縮による片振り疲労試験機を用いて、乾湿両条件下における数種の岩石試料についての疲労特性の究明を行ない、変形特性、上限応力と破壊繰返し数との関係、耐久限度、限界繰返し数等に新知見を得たもので、全編6章よりなる。

第1章は緒論である。

第2章では試料の岩石学的記載と実験装置の記載とがあり、特に試作した岩石用片振り疲労試験機について繰返し応力、繰返しひずみの検討を行ないその信頼性を強調している。

第3章は各気乾試料における繰返し数の増加にともなう応力-ひずみヒステリシスループが変形する過程や残留ひずみが増加する過程等を明らかにした。これらは岩石力学上重要な成果である。

第4章では岩石試料としては従来いまだ求め得なかった上限応力-破壊繰返し数曲線を得ることに成功し、気乾試料では限界繰返し数が $10^4 \sim 10^5$ の範囲にあり、鋼材等でいわれている数値よりはるかに低いことを見出し、またこれより耐久限度を論じている。これは著者によってはじめて得られた知見である。さらに試料の疲労寿命の分布について確率統計論的研究を行ない、岩石の疲労破壊も統計的現象であることを明らかにしている。

第5章は乾湿条件の差異による疲労特性の考究である。湿潤試料における上限応力-破壊繰返し数曲線をはじめ得るとともに、これを気乾試料のそれと比較し、限界繰返し数については両者の間に大差がないが、耐久限度は気乾の場合に比し湿潤の場合の方がかなり低下することを明らかにしている。これも新しい知見である。

第6章は結論である。

以上要するに本研究は従来ほとんど行なわれていない岩石試料の繰返し疲労試験によって、岩石の疲労特性を究明し、岩盤内構造の設計上貴重な数多の知見を提供したものであり、岩石力学ならびに採鉱学への寄与は少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。